

# 力センサを用いない 位置と力のハイブリッド制御

大石 淳\* 宮崎 勝\*\* 藤田 昌弘\*\*  
Kiyoshi OHISHI\* Masaru MIYAZAKI\*\* Masahiro FUJITA\*\*

## Hybrid Position and Force Control without Force Sensor

Generally, a hybrid control is realized by sensor signal feedback of position and force. However, some robot manipulators do not have a force sensor due to the environment of robot manipulator. Moreover, a precise force sensor is very expensive. In order to overcome these problems, this paper proposes the estimation system of reaction force without using a force sensor. This force estimation system consists of the torque observer and the inverse dynamics calculation. Using both this force estimation system and  $H^\infty$  acceleration controller, this paper realizes the hybrid control of position and force without force sensor.  $H^\infty$  acceleration controller is based on  $H^\infty$  control theory, and it takes account of the frequency characteristics of both sensor noise effect and disturbance rejection. The experimental results in this paper illustrate the fine hybrid control of the tested three-degrees-of-freedom DD robot manipulator without force sensor.

Key Words : Force estimation, Hybrid control,  $H^\infty$  Control theory, Torque observer, Acceleration control

### 1. ま え が き

ロボットマニピュレータに組立作業などの環境との接触を伴う動作をさせる場合、位置制御のみで高性能な制御を行うことは困難である。しかしながら、マニピュレータと環境との接触力を検知し、位置と力のハイブリッド制御ができれば、制御性能を向上させることができる。このような制御を迅速で正確に行わせるために、外乱オブザーバやモデル追従加速制御系などの加速コンントローラを用いる手法が提案され、その有効性が立証されてきた<sup>1,2)</sup>。さらに、この加速コンントローラに対して、観測ノイズに対するロバスト安定性と外乱抑止特性の両者を考慮するために、 $H^\infty$ 制御理論の混合感度問題を用いて設計する方法が提案され、ロバストなモー

ション制御に有効であることが示された<sup>3)</sup>。これらのロバスト加速コンントローラに基づくモーション制御は、複雑な運動力学計算を行わずに様々な外乱やパラメータ変動を瞬時に補償し、逆キネマティクスの計算だけで高速度なモーション制御を実現することができる。

次に、力制御を行う場合、一般に力センサを用いている。しかしながら、マニピュレータに力センサを装着することは、マニピュレータの剛性上の問題や作業環境上の条件から困難な場合がある。そのため、マニピュレータが環境に印加した力を推定し、その推定値を力センサの信号の代わりにフィードバックして、力センサを必要としない力制御系を構成する方法が提案された<sup>4,5)</sup>。この力推定機構は、トルクオブザーバに基づく運動力学計算によって構成され、そのときの運動力学計算は力推定値にだけ用いられている。この他に、位置センサの信号を誤差微分することにより、速度、加速信号を生成し、運動力学計算によって外力を算定する手法も提案さ

※ 原稿受付 1992 年 10 月 28 日  
\* 長岡技術科学大学  
\*\* 大阪工業大学

れている<sup>10)</sup>。両者の考え方は基本的に同じである。これに対して、運動力学計算を力推定演算だけでなくマニピュレータのモーション制御まで用いる手法もある<sup>11)</sup>。しかしながら、これは制御構造は簡単であるが、モーション制御のロバスト性とマニピュレータの各軸間の非干渉性の両者に不安を残している。

本論文では、 $H^\infty$ 加速コンントローラとセンサレス力制御系を多関節マニピュレータのモーション制御に拡張させ、力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御系を提案する。 $H^\infty$ 加速コンントローラをモーション制御に適用し、力の推定だけにトルクオブザーバに基づく運動力学計算を用いると、モーション制御と力推定制御は相補速度関数の範囲内でロバストに維持されることになる。また、力推定では慣性行列内の非線形項も考慮するので、線形な力制御も力推定の応答遅延範囲内で構成できることになる。さらに本論文では、トルクオブザーバを用いたロボットマニピュレータのパラメータの同定方法について述べて、同定・設計・制御を通じて、いささかセンサを用いないハイブリッド制御を実現する。

2.  $H^\infty$ 加速コンントローラを用いた  
ハイブリッド制御系

ロボットマニピュレータの各関節に設置されるアクチュエータには、その動作時に摩擦力や重力等の外力が加わる。これらの影響を抑制に抑圧して、迅速で正確なモーション制御を実現する加速コンントローラとして  $H^\infty$ 加速コンントローラがある<sup>12,13)</sup>。

$H^\infty$ 加速コンントローラは Fig. 1 のように構成される。ここで  $K(s)$  は  $H^\infty$ 制御理論の混合感度問題を解いて得られる減速器である。この制御系における加速指令  $\omega^{cmd}$  から位置  $\theta$  までの伝達関数は (1) 式となり、外乱  $d$  から位置  $\theta$  までの伝達関数は (2) 式となる。この加速制御系では、相補感度関数  $T(s)$  で表される周波数範囲において、加速制御が成立している<sup>14)</sup>。

### 2. $H^\infty$ 加速コンントローラを用いた ハイブリッド制御系

ロボットマニピュレータの各関節に設置されるアクチュエータには、その動作時に摩擦力や重力等の外力が加わる。これらの影響を抑制に抑圧して、迅速で正確なモーション制御を実現する加速コンントローラとして  $H^\infty$ 加速コンントローラがある<sup>12,13)</sup>。

$H^\infty$ 加速コンントローラは Fig. 1 のように構成される。ここで  $K(s)$  は  $H^\infty$ 制御理論の混合感度問題を解いて得られる減速器である。この制御系における加速指令  $\omega^{cmd}$  から位置  $\theta$  までの伝達関数は (1) 式となり、外乱  $d$  から位置  $\theta$  までの伝達関数は (2) 式となる。この加速制御系では、相補感度関数  $T(s)$  で表される周波数範囲において、加速制御が成立している<sup>14)</sup>。

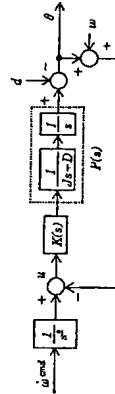


Fig. 1 Schematic diagram of  $H^\infty$  acceleration controller.

$$\frac{\theta}{\omega^{cmd}} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} \cdot \frac{1}{s^2} = T(s) \cdot \frac{1}{s^2} \quad (1)$$

$$\frac{\theta}{d} = \frac{P(s)K(s)}{1+P(s)K(s)} = S(s) \quad (2)$$

$H^\infty$ 加速コンントローラを用いて、多関節ロボットマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御系を位置センサと力センサの2つの信号をフィードバックして構成すると、Fig. 2 のようになる<sup>15)</sup>。Fig. 2 において、位置と力の両者の位置  $P$ 、速度  $\dot{P}$ 、加速度  $\ddot{P}$  と関節逆運動学の関係式は (3) 式から (5) 式となる。また、加速指令  $\ddot{p}^{cmd}$  から各関節の速度指令  $\dot{\omega}^{cmd}$  への変換式は (6) 式となる。その求められた  $\dot{\omega}^{cmd}$  を、各関節逆運動学に代入された  $H^\infty$ 加速コンントローラに入力する構造となっている。そのため、このハイブリッド制御系はロバストな制御を実現することができ、ここで、 $J$  はヤコビアンを表し、 $J^{-1}$  はその逆行列を表す。 $M_0$  は力制御の仮想質量行列である。 $H$  は位置制御と力制御の選択対角行列を表し、その対角要素が1の方向は位置制御を行い、0の方向は力制御を行うことになる。また、 $K_1$  と  $K_2$  は位置制御系の各ゲインである。特に  $K_2$  は力制御のときの目標位置とマニピュレータとの間の振動を抑制するためのフィードバック項も兼ねている。これより、環境との接触を保って安定な制御を行うために、 $K_2$  はある程度大きくする必要があるのである。

$$P = T(\theta) \quad (3)$$

$$\dot{P} = J\dot{\theta} \quad (4)$$

$$\ddot{P} = \dot{J}\dot{\theta} + J\ddot{\theta} \quad (5)$$

$$\dot{\omega}^{cmd} = J^{-1}\ddot{p}^{cmd} - \dot{J}^{-1}\dot{\omega} \quad (6)$$

力センサは向からの理由で使用できない場合がある。そこで本論文ではトルクオブザーバを用いて反力推定器を構成し、その推定値を力センサの信号の代わりにフィードバックすることを提案する。

### 3. 反力推定機構の構成

本論文で用いるトルクオブザーバを Fig. 3 に示す。Fig. 3 において、 $F(s)$  は2次のローパスフィルタ、 $H(s)$  は  $F(s)$  とアクチュエータの拡張モデル  $P_m(s)$  の積からなる補償要素であり、(7)式から(9)式の関係式で表される。Fig. 3 に示すトルクオブザーバは外力トルクをステップ状の関数として定義して Coplanar のオブザーバ設計法に基づいて構成されたものと等価になる<sup>16,17)</sup>。

$$F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (7)$$

$$P_m(s) = \frac{1}{J_m s} \quad (8)$$

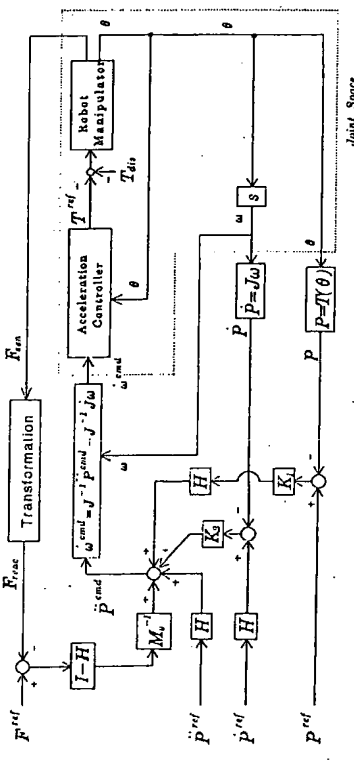


Fig. 2 Hybrid control system of position and force using acceleration controller

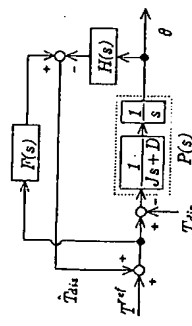


Fig. 3 Block diagram of torque observer

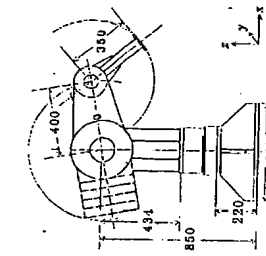
ここで、 $\omega_0$  はトルクオブザーバの固有数値特性を決める固有振動数で、これにより外力  $T_{ext}$  の推定速度を定めることができる。このトルクオブザーバにおいて、 $F(s)$  の出力と  $H(s)$  の出力の和を  $T_{ext}$  とおくと、アクチュエータに加わる実際の外力  $T_{ext}$  から  $\hat{T}_{ext}$  までの伝達関数は (10) 式のように表すことができる。したがって、制御対象  $P(s)$  と被観モデル  $P_m(s)$  が一致し、ローパスフィルタ  $F(s)$  と被観モデル  $P_m(s)$  については、(10) 式は (11) 式のようにになる。

$$\frac{\hat{T}_{ext}}{T_{ext}} = \frac{F(s)P_m(s)}{1 - F(s)} \quad (10)$$

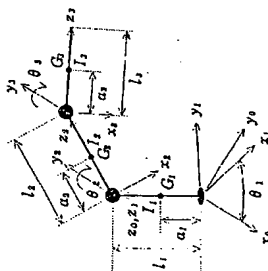
$$= 1 \quad (11)$$

多関節ロボットマニピュレータの各関節に設置されたアクチュエータには、その動作時に (12) 式に表されるような外力  $T_{ext}$  が印加される。ここで、 $T_{int}$  は遠心力やコリオリ力からなる干渉力、 $T_g$  は重力、 $T_{res}$  は反力、 $D$  は粘性摩擦係数、 $F$  はクーロン摩擦である。(12) 式より、反力  $T_{res}$  は (13) 式のように求めることができる。

$$T_{int} = T_{ext} + T_g + T_{res} + D\omega + F \quad (12)$$



(a) Schematic diagram of tested three-degree-of-freedom DD robot manipulator



$l_i$  : length of link  $i$

$a_i$  : length between joint  $i$  and the center of gravity of link  $i$

$m_i$  : mass of link  $i$

$I_i = \begin{bmatrix} I_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & I_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & I_{i3} \end{bmatrix}$  : moment of inertia of link  $i$  about the center of gravity of link  $i$

(b) Parameter of tested DD robot manipulator  
Fig. 4 Tested three-degree-of-freedom DD robot manipulator

メータを求めることができる。先ずリンク 3 において、 $\theta_2 = 0$  として等角速度運動をさせる  $r_{2g}$  が求められ、次に、リンク 2 では  $\theta_3 = 0$  として等角速度運動をさせる  $r_{2g} + r_{3g}$  が求められる。 $r_{2g}$  は最初に求めてあるため、 $r_{2g}$  を求めることができる。

また、リンク 3 の等角速度運動において、位置  $\theta_3$  が  $0$  [rad] のときの入力トルク  $\tau_3$  の大きさが摩擦係数と等しくなることがわかる。同様に、リンク 2 のときは  $\theta_2$  が  $0$  [rad] のときに摩擦係数を求めることができる。しかし、摩擦係数は角速度  $\omega$  の関数である粘性摩擦と、角速度の符号のみに依存するクーロン摩擦からなる。そこで、この等角速度試験を色々な角速度において行うことによ

$$T_g(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -r_{2g}s_2 - r_{3g}s_{23} & 0 \\ r_{2g}s_2 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & 0 & 0 \\ 0 & D_2 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_1 \\ D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_2 \\ D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_3 \end{bmatrix}$$

$$[\omega\omega] = \begin{bmatrix} \omega_1\omega_2 \\ \omega_1\omega_3 \\ \omega_2\omega_3 \end{bmatrix}$$

$$[\omega\omega^2] = \begin{bmatrix} \omega_1^2 \\ \omega_2^2 \\ \omega_3^2 \end{bmatrix}$$

$$s_2 = \sin \theta_2, \quad s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

$$c_2 = \cos \theta_2, \quad c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$\sin(\theta_2 + \theta_3) = \sin(2\theta_2 + \theta_3)$$

$$J_{21} = l_{21} + l_{23} + l_{33}$$

$$J_{22} = l_{22} - l_{23} + m_2 a_2^2 + m_3 l_3^2$$

$$J_{23} = l_{23} - l_{33} + m_2 a_2^2$$

$$J_{31} = l_{31} + m_3 a_3^2$$

$$r_2 = m_2 a_2 + m_3 l_3$$

$$r_3 = m_3 a_3$$

ただし、

$M(\theta)$  : 慣性行列

$B(\theta)$  : コリオリ係数

$C(\theta)$  : 遠心力係数

これらのパラメータを求めて、マニピュレータの逆運動学を解くと、重力などの外力を推定することができる。

#### 4.2 重力項と摩擦項の同定

マニピュレータの各リンクを一つずつ等角速度運動させると、 $\omega = 0$  となり (14) 式は (15) 式のようになる。このとき、同定の対象とならないリンクは固定しておく。

$$\tau = T_g + F \quad (15)$$

$$\tau = T_g + D\omega + F$$

$$\tau_1 = D_1 \omega_1 + D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_1$$

$$\tau_2 = -r_{2g}s_2 - r_{3g}s_{23} + D_2 \omega_2 + D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_2$$

$$\tau_3 = -r_{2g}s_2 - r_{3g}s_{23} + D_3 \omega_3 + D_{fres} \operatorname{sgn} \omega_3$$

この式からわかるように、リンク 2 とリンク 3 に加わる重力は位置  $\theta$  に関する正弦波関数である。そのため、等角速度運動時の位置  $\theta$  と入力トルク  $\tau$  の関係を測定し、その正弦波の振幅を求めることで重力に因するパラ



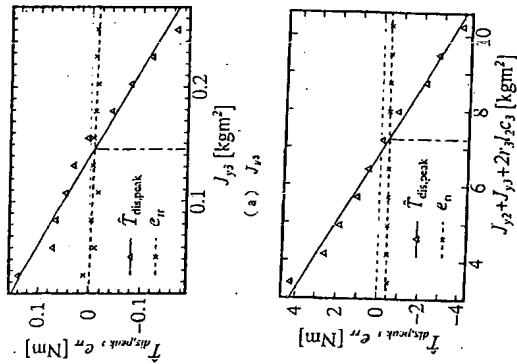


Fig. 8 Experimental results of inertia

マニピュレータの先端に設置された力センサと同様に、環境に加えられた反力の推定値を、Fig. 4 で示される力センサからのフィードバック信号の代わりに用いることで、力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御系を実現することができる。Fig. 10 にそのブロック図を示す。

Fig. 12 のように停止した状態に対する位置と力のハイブリッド制御の結果を示す。実験に用いた  $H^\infty$  加速度コントローラの速度関数  $S(s)$  と相補感度関数  $T(s)$  の周波数特性は Fig. 13 に示す。実験は  $x$  方向に力制御、 $y, z$  方向に位置制御を行った。力指令  $F^{ref}$  として 1 [Hz] の方形波を与え、位置指令  $P^{ref}$  として  $y$  方向に

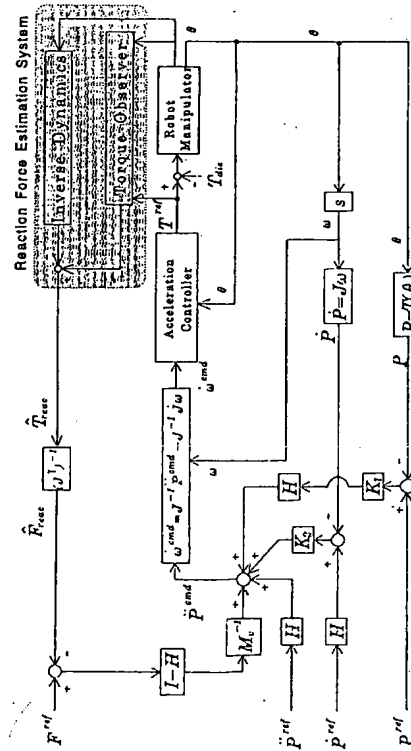


Fig. 10 Hybrid control system of position and force without force sensor

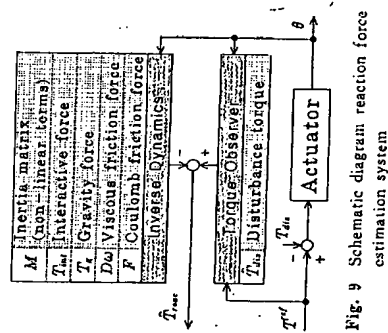


Fig. 9 Schematic diagram reaction force estimation system

## 6. ハイブリッド制御の実験結果

実験には、Fig. 4 (a) に示す通直 3 階節 DD ロボットマニピュレータを使用する。実験のハードウェアシステムは Fig. 11 に示される。制御系は全て DSP (AD77230) のソフトウェアアルゴリズムにより構築されている。先のパラメータの同定実験でも同様のシステムを用いている。

Fig. 12 のように停止した状態に対する位置と力のハイブリッド制御の結果を示す。実験に用いた  $H^\infty$  加速度コントローラの速度関数  $S(s)$  と相補感度関数  $T(s)$  の周波数特性は Fig. 13 に示す。実験は  $x$  方向に力制御、 $y, z$  方向に位置制御を行った。力指令  $F^{ref}$  として 1 [Hz] の方形波を与え、位置指令  $P^{ref}$  として  $y$  方向に

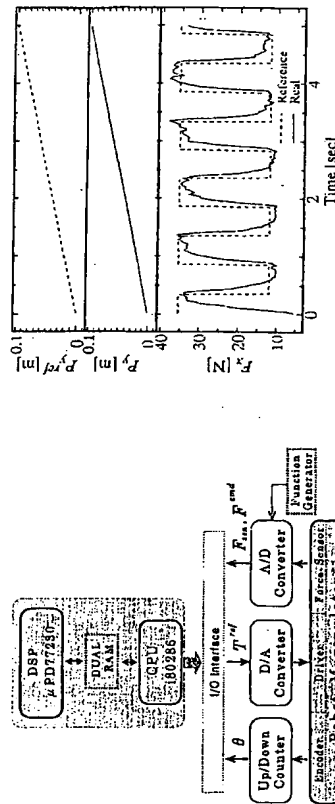
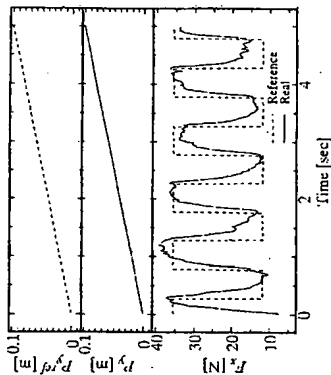


Fig. 11 Hardware system of tested DD robot manipulator

(a) With force sensor



(b) Without force sensor

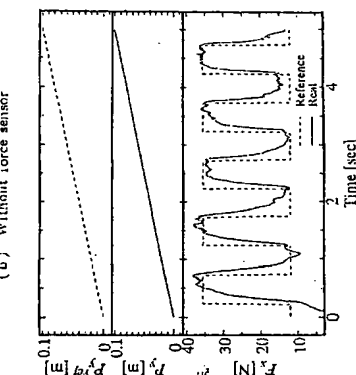
Fig. 13 Frequency characteristics of experimental  $H^\infty$  acceleration controller(c) Without force sensor ( $T_{ref}=0$ )

Fig. 14 Experimental results of hybrid control of position and force

Fig. 14 (c) には力センサを用いないで、さらに干渉力  $T_{ref}=0$  の場合 ( $T_{ref}=0$ ) の結果を示す。その結果

より、力センサを用いない場合も位置と力の応答は所望のものを得られていることがわかる。また、干渉力を考慮しない場合も考慮した場合と何ら変わらない結果が得られている。これは、力制御のように動作の遅い制御では、干渉力による影響が無視できるほど小さいためであると考えられる。なお、実験のソフトウェアのサンプリング時間は1[msec]で、トルクオブザーバの $\hat{F}(s)$ の固有極点 $\omega_n$ は100[rad/sec]である。また、フィードバック定数 $K_1$ と $K_2$ は両者10である。実験に使用した力制御の環境は静止であり、接続状態の安定性は定数 $K_2$ のこの値によって充分保たれる。

## 7. ま と め

本論文では、まず、 $H^\infty$ 制御に基づき系統的に設計した $H^\infty$ 加速度コンローラを用いて高性能な位置と力のハイブリッド制御系を構築した。次に、トルクオブザーバを用いて反力推定機構を構成することにより、力センサを必要としない位置と力のハイブリッド制御系を実現した。本論文の実験結果より、提案する力センサを用いない位置と力のハイブリッド制御系が所望の応答を実現し、有効に機能することを確認した。

提案するハイブリッド制御系は力センサを必要としないため、従来の力センサを用いた場合のマニピュレータと比較して、マニピュレータの構造上の剛性を強く保つことができ、且つ経済的である。また、本論文では、ロボットマニピュレータのパラメータをトルクオブザーバによって同定するので、同定・設計・制御を通じていっさい力センサを使用しない方法を提案している。



大石 謙 (Kiyoshi OHISHI)

1937年10月14日生。1956年3月慶応義塾大学工学部工学専攻卒業。同年4月大阪工業大学専攻工学部。1959年4月同大学助教授。1993年4月長崎県立大学工学部教授。現在、工学博士。主として、電動機制御、ロボットに関する研究に従事。IEEE、制御学会、システム制御情報学会、電気学会、日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)



藤田 昌弘 (Masahiro FUJITA)

1958年3月16日生。1981年3月大阪工業大学工学部電気工学科卒業。1993年3月、同大学工学部電気工学科修士課程修了。現在、工学博士。主として、ロボットの研究に従事。

## 参 考 文 献

- 1) M. Raibert, et al.: "Hybrid Position/Force Control of Manipulators", ASME J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.102, No.2, pp.126-133, 1981.
- 2) C.H. An, et al.: "Model-Based Control of A Robot Manipulator", The MIT Press, 1988.
- 3) 津本:「ロボットの力学と制御」, 朝倉書店, 1990.
- 4) 野田:「ロボット制御」, コロナ社, 1988.
- 5) 野田:「加速に基づく多自由度ロボットの力フィードバック制御」, 電子情報, 100巻, 5号, pp.325-332, 平成5.
- 6) 大石:「DD アルゴリズムの力とコンプライアンスのバスターボット」, 電子情報, 110巻, 11号, pp.1133-1140, 平成11.
- 7) 大石:「位置情報だけを印したマニピュレータのネーションコントロール」, 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.6, pp.799-805, 1992.
- 8) 大石:「モデル適応加速制御系によるコンプライアンス制御」, 第1回日本ロボット学会ロボットシンポジウム, No.1106, 平成3-5.
- 9) 大石:「 $H^\infty$ 制御に基づくセンサレス力制御」, 電子情報, 112巻, 9号, pp.832-861, 平成4-9.
- 10) 森田:「内部センサ情報に基づく加速追従とその制御に関する検討」, 第9回日本ロボット学会技術発表会, No.1432, 平成3-11.
- 11) 編:「力センサを用いないダイレクト・ドライブ・マニピュレータのインビデックス制御」, 日本ロボット学会誌, 7巻, 3号, pp.60-71, 平成6.
- 12) 森田:「ロボットの制御」, 電学誌, 110巻, 8号, pp.649-652, 平成2-3.
- 13) 佐藤:「非線形トルクオブザーバを用いたインターナショナル」, 電子情報, 112巻, 2号, pp.181-182, 平成4-2.
- 14) 大石:「加速制御を用いた電動機駆動の「制御」」, 電子情報, 104巻, 6号, pp.373-379, 平成5-6.
- 15) J.J. Craig: "Introduction to Robotics, Mechanics & Control", ADDISON WESLEY, 1986.
- 16) 森田:「ロボット制御工学入門」, コロナ社, 1989.



宮崎 勝 (Masaru MIYAZAKI)

1958年10月1日生。1981年3月大阪工業大学工学部電気工学科卒業。1993年3月、同大学工学部電気工学科修士課程修了。現在、工学博士。主として、ロボットのメー